

DOI: [10.7242/1999-6691/2012.5.3.32](https://doi.org/10.7242/1999-6691/2012.5.3.32)

УДК 551.515:504.3:532.54

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АТМОСФЕРНЫХ МЕЗОМАСШТАБНЫХ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ ПРИМЕСИ ПРИ ТОРФЯНОМ ПОЖАРЕ

К.Г. Шварц, В.А. Шкляев

*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия*

Представлены результаты численного моделирования процессов переноса загрязняющих веществ, выделяющихся при горении торфа. Для этого на основе трехмерной модели гидротермодинамики мезомасштабных процессов в нижнем слое атмосферы выведена новая квазидвумерная модель распространения многокомпонентной примеси от источника с учетом термической неоднородности подстилающей поверхности. Показано, что большая мощность источника тепла искривляет первоначальную траекторию движения примеси, оказывая тем самым влияние на общее направление ее перемещения.

*Ключевые слова:* адвекция, перенос примеси, двумерная модель, математическое и численное моделирование

## NUMERICAL MODELING OF MESOSCALE ATMOSPHERIC TRANSPORT PROCESSES OF MULTICOMPONENT IMPURITIES AT PEAT FIRING

K.G. Shvarts and V.A. Shklayev

*Perm State National Research University, Perm, Russia*

The results of numerical modeling of transport processes of pollutants emitted by burning peat are presented. Based on a three-dimensional model of hydrothermodynamics of mesoscale processes in the bottom layer of atmosphere, a new quasi-two-dimensional model of multicomponent impurity distribution from the source is developed. The model takes into account the thermal heterogeneity of an underlying surface. It is shown that the high intensity of the heat source distorts the initial trajectory of impurity transport, exerting thereby influence on the general direction of its motion.

*Key words:* advection, impurity transport, two-dimensional model, mathematical and numerical simulation

Экологические последствия лесных и торфяных пожаров заключаются как в причинении ущерба экосистемам, находящимся в зоне их действия [1], так и в загрязнении атмосферного воздуха продуктами горения. Вредные вещества могут переноситься в атмосфере на значительные расстояния, приводя к образованию смогов, ухудшению работы транспорта вследствие снижения видимости, отрицательному воздействию на самочувствие жителей поселений. Своевременный прогноз изменения экологической обстановки даст возможность подготовить население к подобным проявлениям. При значительной площади пожаров наносимый ими ущерб может наблюдаться на расстояниях, составляющих десятки километров от фронта огня. В этом случае важную роль играет прогноз траектории перемещения загрязняющих веществ в пограничном слое атмосферы.

Обычно для оценки переноса примеси над сложной подстилающей поверхностью используются трехмерные гидродинамические модели [2, 3]. На их основе могут быть построены траектории перемещения примесей с учетом ожидаемых погодных условий, скорости и направления ветра в пограничном слое атмосферы [4]. Однако при наличии мощного источника тепла траектория переноса может искажаться за счет нелинейных взаимодействий. Такие процессы рассматривались авторами в работах [5–7] на примере горения разливов нефти. Высокая температура горения не требовала детального учета термических особенностей подстилающей поверхности вне теплового источника. Если же процесс горения происходит менее интенсивно (например, при торфяных пожарах), то температурные контрасты на границе теплового источника уменьшаются, и роль термически неоднородной подстилающей поверхности становится значимей. Такая задача требует более точной оценки температуры поверхности и потоков тепла в приземном слое атмосферы.

### 1. Исходные уравнения

Рассмотрим нижний пограничный слой атмосферы, ограничиваясь мезомасштабными процессами, для которых толщина слоя  $D$  и горизонтальный масштаб движения  $L$  удовлетворяют соотношению

$$\delta_1 = \frac{D}{L} \ll 1. \quad (1)$$

За исходные возьмем трехмерные уравнения гидротермодинамики «сухой» атмосферы во вращающейся декартовой системе координат [8]:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial \Phi}{\partial x} + lv + A_M \Delta u + \frac{\partial}{\partial z} k_M \frac{\partial u}{\partial z}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{\partial \Phi}{\partial y} - lu + A_M \Delta v + \frac{\partial}{\partial z} k_M \frac{\partial v}{\partial z}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{\partial \Phi}{\partial z} + \beta \theta + A_M \Delta w + \frac{\partial}{\partial z} k_M \frac{\partial w}{\partial z}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (5)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + u \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial y} + w \frac{\partial \theta}{\partial z} = A_T \Delta \theta + \frac{\partial}{\partial z} k_T \frac{\partial \theta}{\partial z}. \quad (6)$$

В качестве загрязняющих веществ выберем оксид углерода (газ, легкая примесь) и твердые тяжелые частицы трех размеров в диапазоне от 4 до 40 мкм ( $r_1$  принимает значения 4...10 мкм,  $r_2$  — 10...20 мкм и  $r_3$  — 20...40 мкм). Это позволяет определить концентрацию частиц дыма разного размера  $\varphi_j$  ( $j = 1, 2, 3, 4$ ) на различном удалении от источника горения, учитывая их неравную скорость оседания  $w_{gj}$  ( $j = 2, 3, 4$ ) согласно формуле Стокса [9]

$$\frac{\partial \varphi_1}{\partial t} + u \frac{\partial \varphi_1}{\partial x} + v \frac{\partial \varphi_1}{\partial y} + w \frac{\partial \varphi_1}{\partial z} = A_S \Delta \varphi_1 + \frac{\partial}{\partial z} k_S \frac{\partial \varphi_1}{\partial z}, \quad (7)$$

$$\frac{\partial \varphi_j}{\partial t} + u \frac{\partial \varphi_j}{\partial x} + v \frac{\partial \varphi_j}{\partial y} + (w - w_{gj}) \frac{\partial \varphi_j}{\partial z} = A_S \Delta \varphi_j + \frac{\partial}{\partial z} k_S \frac{\partial \varphi_j}{\partial z}, \quad (j = 2, 3, 4). \quad (8)$$

Запишем начальные условия

$$u = -c_g \sin(dd), \quad v = -c_g \cos(dd), \quad \theta = \theta_s, \quad \varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3 = \varphi_4 = 0 \quad \text{при } t = 0;$$

граничные условия [9]:

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial v}{\partial z} = 0, \quad w = 0, \quad \frac{\partial \theta}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial \varphi_1}{\partial z} = 0, \quad \varphi_j = 0 \quad (j = 2, 3, 4) \quad \text{при } z = D; \quad (9)$$

$$u = v = w = 0, \quad \frac{\partial \theta}{\partial z} = \gamma_i (\theta - \theta_s), \quad \frac{\partial \varphi_j}{\partial z} = \alpha_j \varphi_j - f_{sj} \quad (j = 1, 2, 3, 4) \quad \text{при } z = 0. \quad (10)$$

В уравнениях (2)–(10) приняты обозначения:  $t$  — время; ось  $Ox$  направлена на восток, ось  $Oy$  — на север, а ось  $Oz$  — вертикально вверх;  $\vec{v} = (u, v, w)$  — вектор скорости движения воздуха;  $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$  — двумерный оператор Лапласа;  $\Phi = RT_{cp} p' / p$  — флуктуации геопотенциала ( $R$  — удельная газовая постоянная,  $T_{cp}$  — средняя температура воздуха в слое,  $p'$  — флуктуации атмосферного давления);  $l$  — параметр Кориолиса; для представления турбулентных потоков и напряжений используется концепция коэффициентов турбулентного обмена, при этом  $A_M$ ,  $k_M$  — коэффициенты горизонтальной и вертикальной турбулентной вязкости;  $\theta = T(p_0/p)^{R/c_p}$  — потенциальная температура ( $p$  — атмосферное давление, зависящее лишь от высоты,  $p_0$  — атмосферное давление у поверхности земли,  $c_p$  — теплоемкость при постоянном давлении);  $\beta = g/\bar{\theta}$  — параметр плавучести ( $g$  — ускорение силы тяжести,  $\bar{\theta}$  — средняя потенциальная температура окружающего воздуха);  $A_T$ ,  $k_T$  — коэффициенты горизонтальной и вертикальной турбулентной теплопроводности;  $A_S$ ,  $k_S$  — коэффициенты горизонтальной и вертикальной турбулентной диффузии (считаются постоянными величинами);  $c_g$  — скорость геострофического ветра на верхней свободной границе пограничного слоя атмосферы,  $dd$  — азимут геострофического ветра;  $\theta_s$  — температура воздуха на уровне шероховатости подстилающей поверхности;  $\gamma_i$  — коэффициент теплоотдачи ( $i$  — номер типа

шероховатой поверхности);  $\alpha_j$  — коэффициент поглощения подстилающей поверхностью  $j$ -й примеси; функция  $f_{sj} = \sum_{i=1}^m f_{sj}^i \delta(x-x_i) \delta(y-y_i)$  описывает вклад источника  $j$ -й примеси  $f_{sj}^i$  на уровне шероховатости в загрязнение пограничного слоя атмосферы в исследуемой области [8, 9] ( $\delta$  — дельта-функция,  $x_i, y_i$  — координаты источника,  $m$  — число точек при заданном разбиении подстилающей поверхности, занимаемых источником примеси).

Рассмотрим площадку размерами  $L \times L$ . Скорость геострофического ветра  $c_g$  над пограничным слоем атмосферы и его направление, толщина пограничного слоя  $D$  считаем известными величинами. Горизонтальные поля скорости ветра выше подстилающей поверхности вычисляются по формулам [10]:  $u = -c_g \sin(dd)$ ,  $v = -c_g \cos(dd)$ . Так, например, при  $dd = 0$  ветер северный, а при  $dd = 90^\circ$  ветер восточный. Также ветер может задаваться в виде среднего поперек слоя поля скорости. На боковых границах предполагаем выполнение условий:  $\frac{\partial \bar{v}}{\partial n} = 0$ ,  $\frac{\partial \theta}{\partial n} = 0$ ,  $\frac{\partial \phi_j}{\partial n} = 0$ , где  $n$  — внешняя нормаль на боковых границах подстилающей поверхности.

## 2. Двумерная модель

Для математического моделирования переноса нагретой примеси от приземного источника построим двумерную модель на основе локально-равновесного подхода [12, 13] по методике, подробно описанной в работах [6, 11]. Ограничимся рассмотрением мезомасштабных процессов (1), полагая, что

$$t_* \gg t_r, \quad (11)$$

где  $t_*$  — характерное время равновесных состояний, а  $t_r$  — время релаксации воздушных течений к состоянию равновесия при изменении внешних условий. Введем безразмерную переменную  $\zeta = z/D$ ,

обозначим любую среднюю поперек слоя величину как  $\langle g \rangle = \int_0^1 g(t, x, y, \zeta) d\zeta$ . Двумерную модель получим

из трехмерной путем усреднения поперек слоя трехмерной модели (2)–(8), используя граничные условия (9), (10). Для замыкания системы трехмерных уравнений необходимо выразить нелинейные слагаемые, а также значения скорости, температуры и концентрации примесей на границах через средние поля  $\langle u \rangle, \langle v \rangle, \langle \theta \rangle, \langle \phi_j \rangle$ . С этой целью воспользуемся точным решением исходной задачи, описывающим однородное в направлении  $x, y$  течение. Решение находится для бесконечного горизонтального вращающегося слоя в предположении несжимаемости воздуха в нижнем слое атмосферы и линейного распределения температуры подстилающей поверхности и имеет следующее представление:

$$M(\zeta) = f_1(\zeta) \langle M \rangle - 2f_2(\zeta) U, \quad (12)$$

$$\theta = \langle \theta \rangle + O(\text{Ek} \delta^2), \quad (13)$$

$$\phi_1 = \langle \phi_1 \rangle + O(\text{Ek} \delta^2), \quad (14)$$

$$\phi_j(\zeta) = \langle c \rangle + \frac{f_{sj}}{\alpha_j D (1 - \exp(-\text{Re}_{vj})) + \text{Re}_v} \left[ e^{-\text{Re}_{vj} \zeta} - \frac{1 - e^{-\text{Re}_{vj}}}{\text{Re}_{vj}} \right] \quad (j = 2, 3, 4). \quad (15)$$

В формулы (12)–(15) входят комплекснозначная функция скорости  $M(\zeta) = u(\zeta) + iv(\zeta)$ ,  $i = \sqrt{-1}$ , базовые

функции  $f_1(\zeta) = \frac{1}{1 - \text{th} \lambda / \lambda} \left[ 1 - \frac{\text{ch}(\lambda \zeta)}{\text{ch} \lambda} \right]$ ,  $f_2 = \left[ \frac{\text{th} \lambda}{\lambda} + \frac{1 - \text{ch} \lambda}{\lambda^2 \text{ch} \lambda} - \frac{1}{2} \right] f_1(\zeta) - \frac{\text{ch}(\lambda \zeta)}{\text{ch} \lambda} - \frac{\text{sh}[\lambda(\zeta - 1)]}{\lambda \text{ch} \lambda} + \zeta$ , величины

$\langle M \rangle = \langle u \rangle + i \langle v \rangle$ ,  $U = u_x + i u_y$ , параметр  $\lambda = (1 + i) / \sqrt{2 \text{Ek}}$ , число Экмана  $\text{Ek} = k_M / (l D^2)$ , компоненты

скорости термического ветра  $u_x = -\beta D \cdot \frac{\partial \langle \theta \rangle}{\partial y} / (2l)$ ,  $u_y = -\beta D \cdot \frac{\partial \langle \theta \rangle}{\partial x} / (2l)$  вертикальное число Рейнольдса

$\text{Re}_{vj} = w_{gj} D / k_M$ .

Полагая, что при выполнении условий (1) и (11) формулы (12)–(15) правильно (асимптотически верно по малому параметру  $\delta_1$ ) описывают структуру термически неоднородного потока мезомасштабных

течений воздуха в каждой точке слоя в любой момент времени, используем их в качестве замыкающих соотношений. Определим вихрь скорости формулой:  $\omega(t, x, y) = \frac{\partial \langle v \rangle}{\partial x} - \frac{\partial \langle u \rangle}{\partial y}$ . Учитывая бездивергентность

средней поперек слоя скорости  $\frac{\partial \langle u \rangle}{\partial x} + \frac{\partial \langle v \rangle}{\partial y} = 0$ , введем функцию тока  $\psi(t, x, y)$ :  $\langle u \rangle = -\frac{\partial \psi}{\partial y}$ ,  $\langle v \rangle = \frac{\partial \psi}{\partial x}$ .

Выберем в качестве единиц измерения длины, скорости, времени, температуры и концентрации примеси, соответственно,  $L$  и  $c_g$ ,  $L/c_g$ ,  $\theta_0$  и  $\varphi_{\text{ИДК}j}$  — предельно допустимые концентрации компонент примеси. Тогда в терминах вихря скорости  $\omega$ , функции тока  $\psi$ , средней поперек слоя потенциальной температуры  $\theta(t, x, y)$ , приведенной к размерности функции тока:  $\theta = \beta D \langle \theta \rangle / (2l)$ , и средних поперек слоя концентраций  $\varphi_j(t, x, y)$  уравнения модели для описания мезомасштабных процессов в нижнем слое атмосферы имеют следующее обезразмеренное представление:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + k_1 \{ \psi, \omega \} + k_3 \text{Rt} [ \{ \theta, \omega \} + \{ \psi, \Delta \theta \} ] - k_5 \text{Rt}^2 \{ \theta, \Delta \theta \} = \frac{1}{\text{Re}} \Delta \omega - \mu (k_7 \omega - k_8 \text{Rt} \Delta \theta), \quad (16)$$

$$\Delta \psi = \omega, \quad (17)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \{ \psi, \theta \} = \frac{1}{\text{Pe}} \Delta \theta - \bar{q} (\theta - \bar{\theta}_s), \quad (18)$$

$$\frac{\partial \varphi_1}{\partial t} + \{ \psi, \varphi_1 \} = \frac{1}{\text{Pe}_s} \Delta \varphi_1 - \frac{\alpha_1 k_s}{D} \varphi_1 + \sum_{i=1}^m \bar{f}_{s1}^i \delta(x - x_i) \delta(y - y_i), \quad (19)$$

$$\frac{\partial \varphi_j}{\partial t} + \{ \psi, \varphi_j \} = \frac{1}{\text{Pe}} \Delta \varphi_j - \frac{\alpha_j k_s + w_{gj}}{D} \varphi_j + \sum_{i=1}^m \frac{k_s \bar{f}_{sj}^i}{D} \left[ 1 - \frac{e^{-\text{Re}_v}}{D(1 + \alpha_{cj} D)} \right] \delta(x - x_i) \delta(y - y_i) \quad (j = 2, 3, 4), \quad (20)$$

где  $\{ \psi, \omega \} = \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial \omega}{\partial y} - \frac{\partial \psi}{\partial y} \frac{\partial \omega}{\partial x}$  — якобиан;  $\mu = l c_g / L$  — безразмерный коэффициент трения о подстилающую

поверхность,  $\text{Re} = c_g L / A_M$  — число Рейнольдса,  $\text{Rt} = \beta D \delta \theta / (2 l c_g L)$  — аналог термического числа Россби [10],  $\bar{q} = q c_g / L$  — безразмерный коэффициент выхолаживания,  $\text{Pe} = c_g L / A_T$  — число Пекле,

$\bar{f}_{sj}^i = \frac{f_{sj}^i}{\varphi_{\text{ИДК}j}} \frac{k_s L}{c_g D}$ ,  $\text{Pe}_s = c_g L / A_s$  — концентрационное число Пекле,  $q = \gamma_i k_T / D$ . Значения коэффициентов

$k_1 = \Re \langle f_1 f_1 \rangle$ ,  $k_3 = \Re \langle f_1 f_2 \rangle$ ,  $k_5 = \Re \langle f_2 f_2 \rangle$ ,  $k_7 = \Re f_1'(1)$ ,  $k_8 = \Re f_2'(1)$  ( $\Re$  — действительная часть) зависят от величины числа Экмана. В исследуемом случае над источником (при  $\text{Ek} = 1$ ) имеем:  $k_1 = 1,199$ ,  $k_3 = 0,00077$ ,  $k_5 = 0,0005909$ ,  $k_7 = 3,0057$ ,  $k_8 = 0,000952$ , а вне источника (при  $\text{Ek} = 0,5$ ) —  $k_1 = 1,197$ ,  $k_3 = 0,003036$ ,  $k_5 = 0,002312$ ,  $k_7 = 3,0022$ ,  $k_8 = 0,01064$ .

Запишем начальные условия:

$$\psi = y \sin(dd) - x \cos(dd), \quad \omega = 0, \quad \theta = \theta_s, \quad \varphi_j = 0 \quad \text{при } t = 0; \quad (21)$$

граничные условия:

$\psi = y \sin(dd) - x \cos(dd)$  — на наветренной стороне;

$$\frac{\partial \psi}{\partial n} = 0, \quad \omega = 0, \quad \frac{\partial \theta}{\partial n} = 0, \quad \frac{\partial \varphi_j}{\partial n} = 0 \quad \text{— на подветренной стороне,} \quad (22)$$

где  $n$  — внешняя нормаль к боковой границе.

### 3. Численные расчеты

Расчеты проводились на основе системы уравнений (16)–(20) с начальными и граничными условиями (21), (22). Область эксперимента размером  $40 \times 40$  км включала горящие торфяники в окрестности г. Краснокамска (Пермский край) и западную часть г. Перми.

Использовалась явная конечно-разностная схема [11] на сетке  $200 \times 200$  узлов. Для более корректного учета термической неоднородности подстилающей поверхности осуществлялась параметризация процессов переноса тепла в приповерхностном слое атмосферы. На основе теории подобия Монина–Обухова вычислялись коэффициенты теплопередачи в приземном слое для различных типов поверхности. Рассматривалось пять ее типов: поле, лес, городская застройка, водная поверхность и поверхность с мелким кустарником, включающая заболоченные участки. Эти данные определялись по топографической карте для каждого узла сетки. Толщина слоя составляла  $D = 1000$  м, параметр Кориолиса на данной широте —  $l = 1,24 \cdot 10^{-4}$  1/с. Задавались различные значения коэффициента вертикальной турбулентной диффузии над источником и вне его. Коэффициент турбулентной диффузии по горизонтали принимался равным  $500 \text{ м}^2/\text{с}$ , по вертикали  $k_M = k_T = k_S = lD^2/2 = 62 \text{ м}^2/\text{с}$  вне источника и  $k_M = k_T = k_S = lD^2 = 124 \text{ м}^2/\text{с}$  над источником. Проверялись также различные варианты сглаживания температуры подстилающей поверхности. Температура и мощность источника примесей определялись исходя из скорости сгорания торфа (массы сгоревшего за единицу времени материала) и его теплоты сгорания [1].

При расчетах полагались следующие погодные условия: слабая неустойчивость атмосферы, северо-западный ветер, направление  $300^\circ$ , скорость ветра на верхней границе пограничного слоя  $2 \text{ м/с}$ . В зависимости от типа шероховатости подстилающей поверхности приземная температура воздуха  $\theta_s$  колебалась от  $10^\circ\text{C}$  до  $23^\circ\text{C}$  (Рис. 1), а коэффициент теплообмена имел значения  $\gamma_1 = 1,676369 \cdot 10^{-3} \text{ 1/м}$ ,  $\gamma_2 = 0,271385 \cdot 10^{-3} \text{ 1/м}$ ,  $\gamma_3 = 0,205127 \cdot 10^{-3} \text{ 1/м}$ ,  $\gamma_4 = 0,463773 \cdot 10^{-3} \text{ 1/м}$ ,  $\gamma_5 = 0,221323 \cdot 10^{-3} \text{ 1/м}$ .

Выбор в качестве загрязняющих веществ оксида углерода и твердых частиц трех размеров позволил, учитывая различную скорость оседания частиц, определять концентрацию дыма на различном удалении от источника горения, и оценить границы возможного переноса дыма и угарного газа на районы города. Рассчитывались средние поперек слоя поля температуры, функции тока, флуктуаций функции тока, вихря, концентрации примесей.

Численный эксперимент включал три этапа: расчеты при отсутствии «горячего» источника примеси; расчеты с источником типа 1 (точечный, с небольшой — размеры около  $100 \times 100$  м — площадью горения); расчеты с источником типа 2 (с увеличенной — размеры около  $200 \times 200$  м — площадью горения).

На первом этапе концентрации примеси не рассчитывались; перенос частиц прослеживался по полю функции тока, вдоль изолиний которой он осуществляется (Рис. 2, а, б). Поля температуры, функции тока и вихря скорости (Рис. 2, в, г), полученные в этом случае,

характеризовались наибольшими искажениями в зонах с максимальными горизонтальными градиентами температуры (это зоны город–река). Максимальная скорость ветра увеличилась на  $13,5\%$  — до  $2,27 \text{ м/с}$ .

При расчетах с источником типа 1 выполнялась процедура сглаживания поля температуры воздуха. Это было обусловлено тем, что при значительных локальных изменениях приземной температуры за счет турбулентного обмена в горизонтальном направлении происходит выравнивание таких неоднородностей. Источник примеси располагался северо-восточнее Краснокамска; ему соответствовал

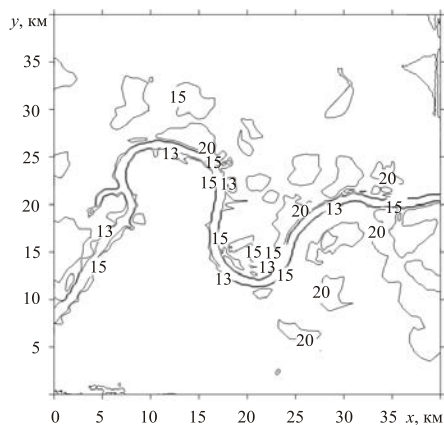


Рис. 1. Распределение приземной температуры воздуха  $\theta_s$ ,  $^\circ\text{C}$

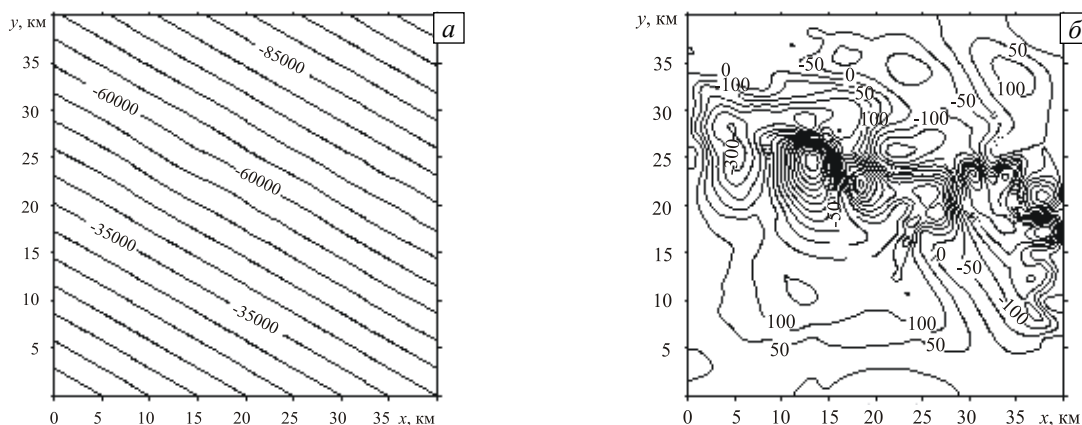


Рис. 2. Поля функции тока  $\psi$  (а) и разности  $\psi - \psi|_{t=0}$ ,  $[\text{м}^2/\text{с}]$  (б), поля средней в слое температуры воздуха,  $^\circ\text{C}$  (в) и среднего вихря в слое,  $[\text{с}^{-1}]$  (г) (максимум вихря  $0,001$  наблюдается в зоне наибольших контрастов средней температуры воздуха)

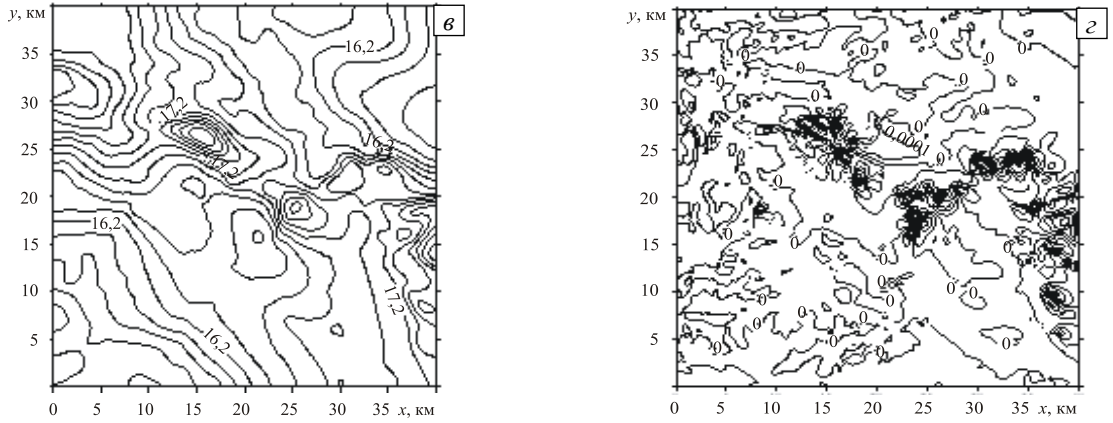


Рис. 2. Продолжение

узел сетки с координатами  $x_1 = 14$  км,  $y_1 = 31$  км. Температура источника составляла  $450^\circ\text{C}$ . Скорости оседания тяжелых компонент примеси размеров  $r_1, r_2, r_3$ , соответственно, равнялась  $w_{g2} = 0,007$  м/с,  $w_{g3} = 0,028$  м/с,  $w_{g4} = 0,12$  м/с.

При локальном нагреве в окрестности источника примеси (Рис. 3, а) возникает слабое вихревое движение воздуха (Рис.3, б). Имеет место слабое циклоническое движение в центре площадки (Рис. 3, в). Максимальная скорость ветра достигает значения  $2,09$  м/с. Влияние небольшой области нагрева практически не сказывается на процессе переноса загрязняющих веществ (Рис. 4).

Расчеты с источником типа 2 показали, что увеличение площади пожара в 4 раза приводит к более интенсивному нагреву воздуха, и над областью пожара в пределах пограничного слоя атмосферы могут формироваться вихревые структуры. В результате этого изменяется траектория движущихся частиц воздуха, что приводит к искривлению зоны рассеивания загрязняющих веществ.

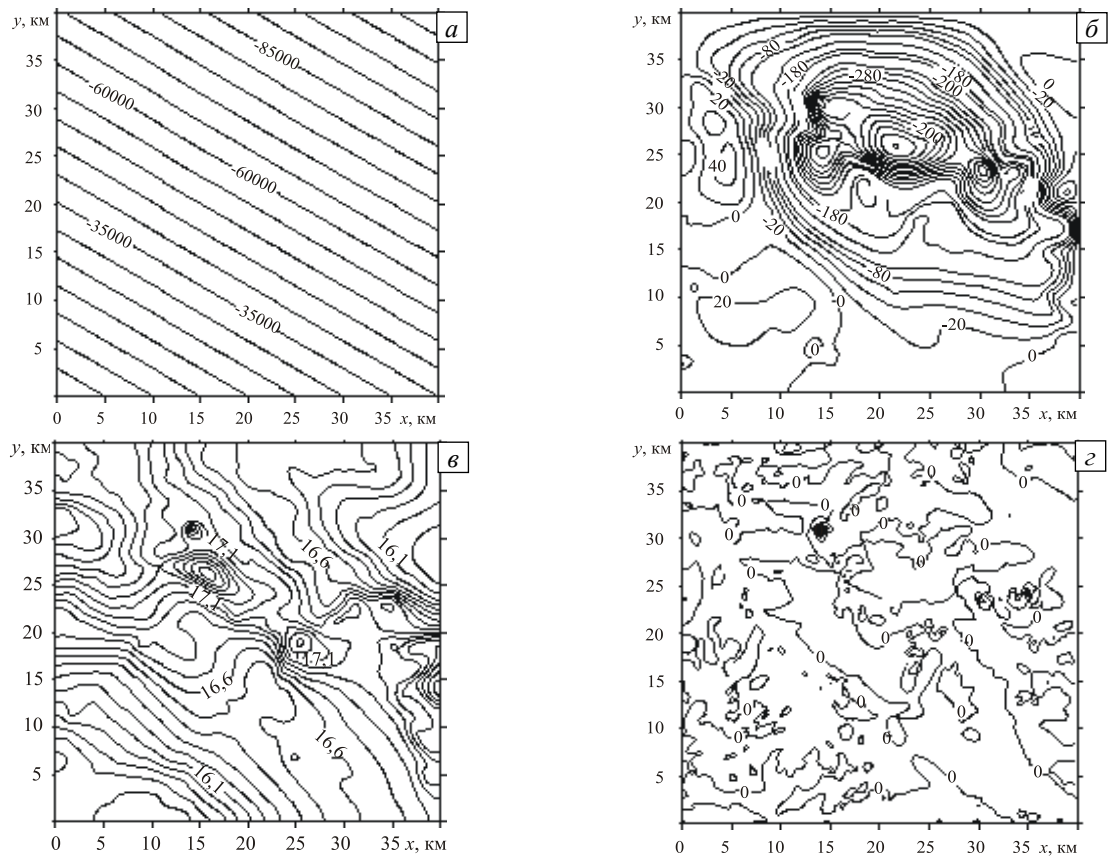
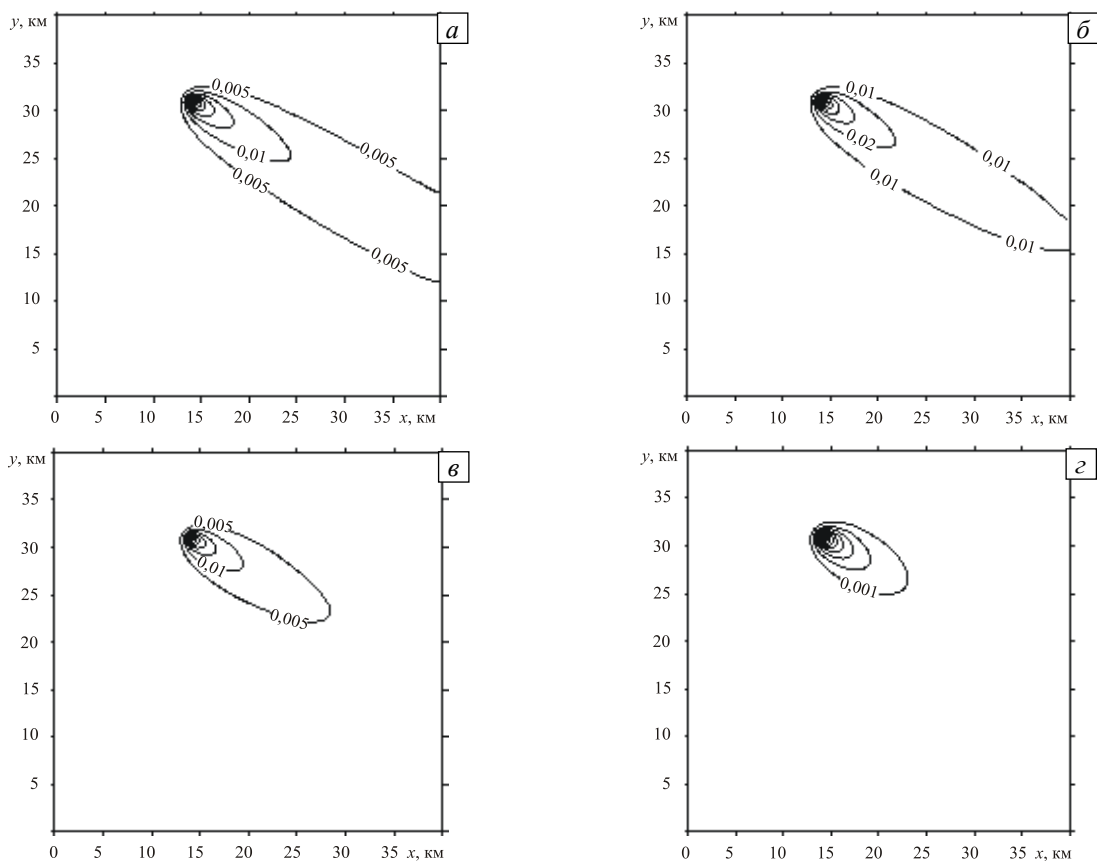


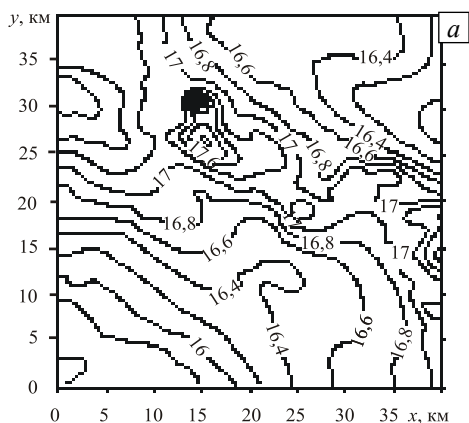
Рис. 3. Влияние локального нагрева на поля функции тока  $\psi$  (а) и разности  $\psi - \psi|_{t=0}$ ,  $[\text{м}^2/\text{с}]$  (б), поля средней в слое температуры воздуха,  $[\text{°C}]$  (в) и среднего вихря в слое,  $[\text{с}^{-1}]$  (г) (максимум вихря  $0,0011$  наблюдается в зоне наибольших контрастов средней температуры воздуха)



**Рис. 4.** Поля концентрации газообразной примеси (а), частиц  $r_1$  (б),  $r_2$  (в) и  $r_3$  (г) в долях предельно допустимой концентрации (ПДК)

При выбранных начальных условиях и использовании источника типа 2 над областью пожара (Рис. 5, а) в пределах пограничного слоя атмосферы формируется пара слабых нестационарных вихрей (Рис. 5, б, в), которые вращаются над источником тепла против часовой стрелки с периодом около 0,2 единиц модельного времени (4000 с). Над площадкой на фоне геострофического ветра формируется циклонический вихрь (Рис. 5, г, е) и с тем же периодом возникает и исчезает небольшой антициклонический вихрь (Рис. 5, д, ж). Скорость ветра изменяется от 2,5 м/с до 4 м/с. В результате этого изменяется траектория движущихся частиц воздуха, что приводит к искривлению зоны рассеивания загрязняющих веществ.

На рисунке 6 представлены предельные колебания поля концентрации газообразной примеси при значениях безразмерного времени  $t = 1,58$  и  $t = 1,68$ . Колебания проявляют периодический характер, а наблюдаемые в этом случае, траектории движения отдельных частиц от центра факела в направлении дующего ветра — волнообразный характер. Видно, что со временем увеличивается поперечный размер факела, но средняя концентрация в зоне рассеивания падает. Расчеты показали также, что уменьшение вертикальной турбулентной диффузии вне источника приводит к сужению зоны загрязнения (уменьшаются горизонтальные размеры факела).



**Рис. 5.** Поля средней в слое температуры воздуха [°C] (а), среднего вихря в слое [ $c^{-1}$ ] при  $t = 1,58$  (б) и  $t = 1,68$  (в), функции тока  $\psi$  при  $t = 1,58$  (г) и  $t = 1,68$  (д) и разности  $\psi - \psi|_{t=0}$  при  $t = 1,58$  (е) и  $t = 1,68$  (ж), [ $m^2/c$ ]

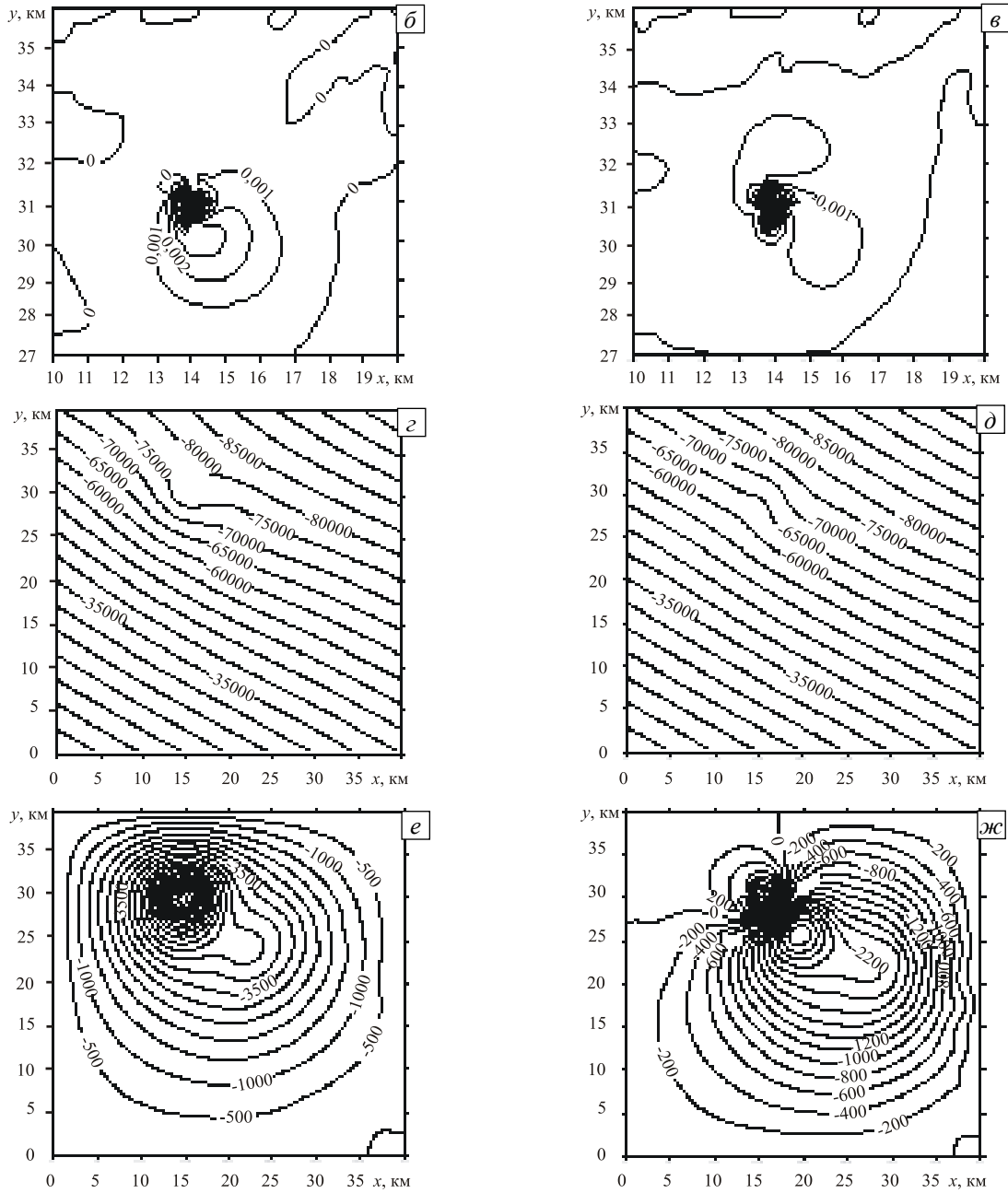


Рис. 5. Продолжение

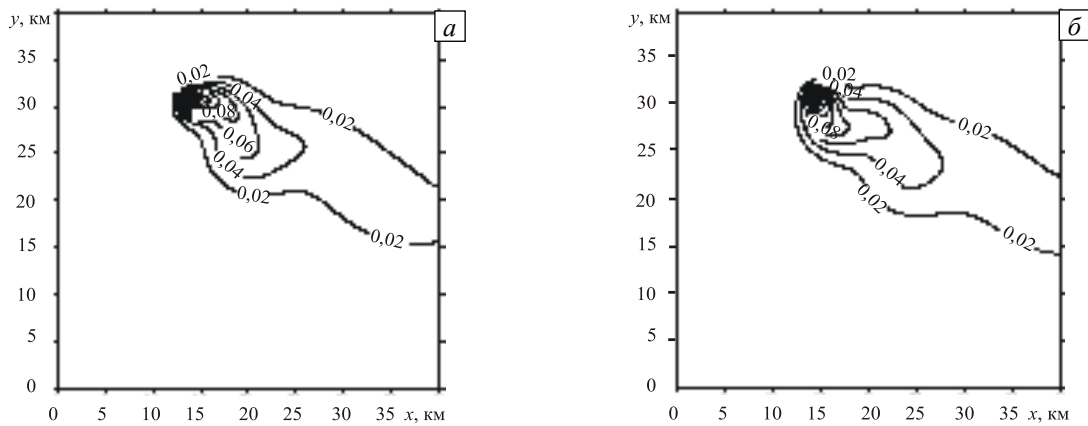


Рис. 6. Поля концентрации газообразной примеси (а), (б), частиц  $r_1$  (в), (з),  $r_2$  (д), (е) и  $r_3$  (ж), (з) в долях ПДК при  $t = 1,58$  (а, в, д, ж) и  $t = 1,68$  (б, з, е, з)



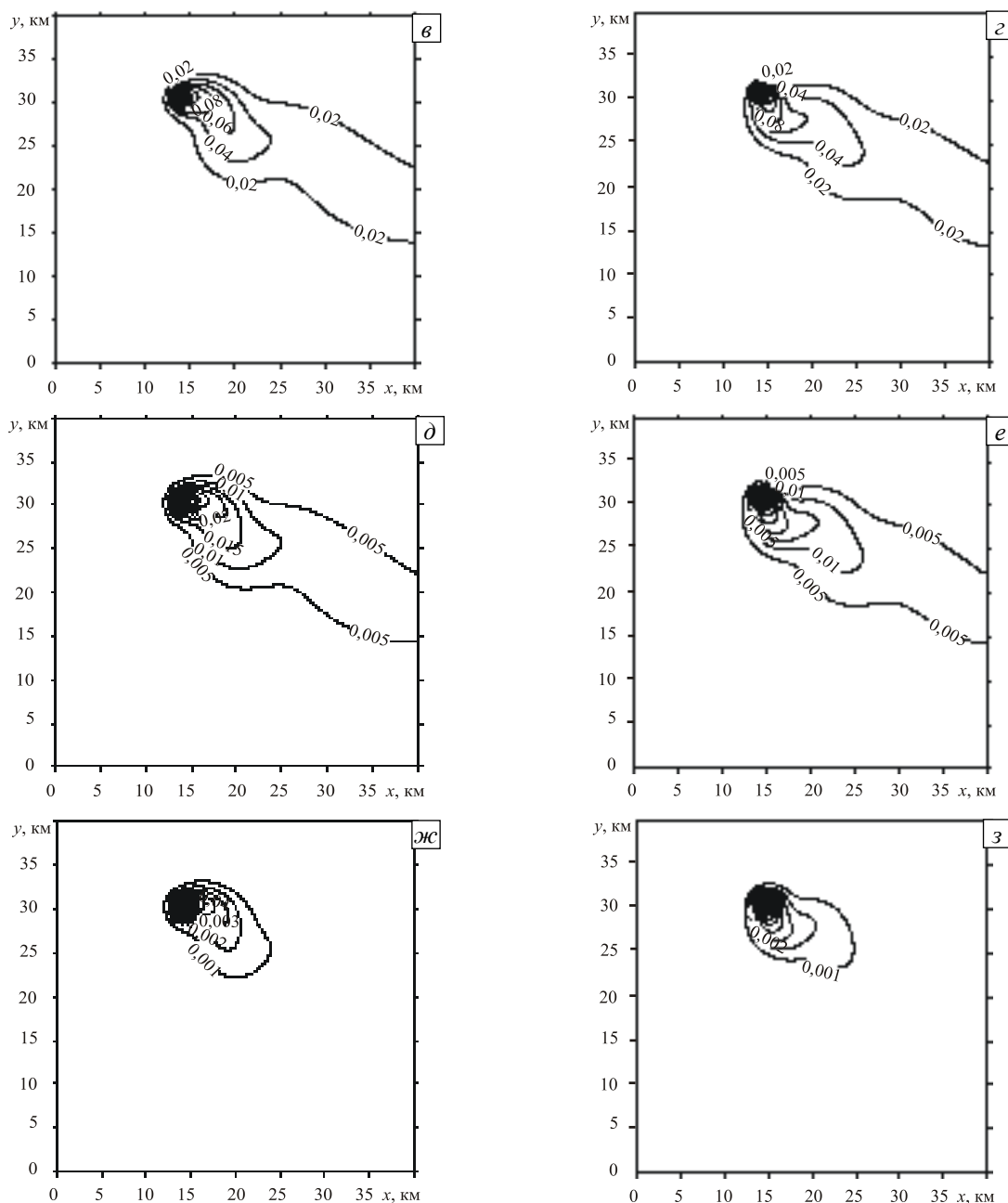
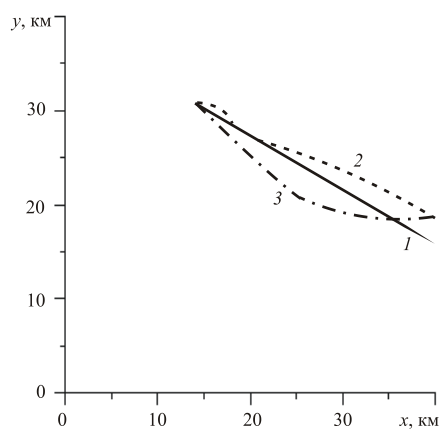


Рис. 6. Продолжение

Рис. 7. Траектории перемещения загрязняющих веществ при «холодном» (1) и «горячем» (2, 3) источниках при  $t = 1,58$  и  $t = 1,68$ , соответственно

Для оценки размеров ожидаемой зоны загрязнения были построены траектории частиц, совпадающих с осью факела, изображенного на рисунке 6, приходящиеся на разные моменты времени. Эти траектории сравнивались с траекторией при «холодном» источнике, найденной по фактическому направлению ветра (сплошная линия на рисунке 7). Безразмерное время соответствовало  $t = 1,58$  и  $t = 1,68$ .

Из рисунка видно, что на расстоянии 20...25 км от источника разброс траекторий индивидуальных частиц может составлять около 5 км, что, соответственно, увеличивает общую площадь, подверженную загрязнению. Известно, что размер факела рассеивания примеси определяется погодными условиями и характеризуется так называемыми  $\sigma$ -кривыми. Кроме условий

стратификации атмосферы, на их величину влияет также характер подстилающей поверхности. В рассматриваемом случае увеличение зоны рассеивания примеси при наличии «горячего» источника большой мощности может толковаться как дополнительный фактор, влияющий на поперечный размер факела.

#### 4. Выводы

Представлена квазидвумерная модель мезомасштабных атмосферных процессов и переноса многокомпонентной примеси от торфяного пожара в окрестности населенных пунктов с учетом термической и динамической неоднородности подстилающей поверхности. Численное моделирование произведено методом сеток с помощью явной конечно-разностной схемы.

При наличии мощного теплового источника в атмосфере над ним меняется величина коэффициента вертикальной диффузии, формируется вихревое движение в пограничном слое атмосферы. Образовавшийся нестационарный вихрь способствует искривлению траекторий отдельных порций загрязняющих веществ на начальном участке и приводит к увеличению зоны рассеивания. На удалении в 20...25 километров от источника выброса траектории отдельных частиц могут быть смещены относительно друг друга на расстояние до 5 км. Наличие теплового воздействия источника загрязняющих веществ играет роль дополнительного фактора, увеличивающего поперечные (горизонтальные) размеры факела.

Работа выполнена в рамках тематического плана НИР ПГНИУ №5.5061.2011 «Математическое моделирование мезомасштабных атмосферных процессов переноса вредных примесей от нестационарных тепловых источников».

#### Литература

1. Гришин А.М. О математическом моделировании торфяных пожаров // Вестник ТГУ. Математика и механика. – 2008. – № 3. – С. 85-95.
2. Бояришинов М.Г., Балабанов Д.С. Вычислительное моделирование движения сжимаемой среды, генерируемой точечным источником // Вычисл. мех. сплош. сред. – 2010. – Т. 3, № 3. – С. 18-31. DOI
3. Гаврилов К.А., Morvan D., Accary G., Любимов Д.В., Meradji S., Бессонов О.А. Численное моделирование когерентных структур при распространении примеси в атмосферном пограничном слое над лесным пологом // Вычисл. мех. сплош. сред. – 2010. – Т. 3, № 2. – С. 34-45. DOI
4. Белов П.Н., Карлова З.Л. Траекторная модель переноса загрязнений // Метеорология и гидрология. – 1990. – № 12. – С. 67-74.
5. Шварц К.Г., Шкляев В.А. Моделирование процессов переноса примеси в нижнем слое атмосферы, связанных с выбросами большой мощности при аномальном температурном нагреве // Вестник УдмГУ. – 2010. – Вып. 4. – С. 156-159.
6. Шварц К.Г., Шкляев В.А. Численное моделирование мезомасштабных вихревых структур вблизи мощного горячего источника примеси в пограничном слое атмосферы // Вычисл. мех. сплош. сред. – 2009. – Т. 2, № 1. – С. 96-106. DOI
7. Shvarts K.G., Shklyayev V.A. Role of vertical structure generated by a powerful heat source in propagation of an impurity in atmosphere // Int. Conf. "Fluxes and structures in Fluids", July 2-7, 2007, St.-Petersburg, Selected Papers, 2008. – P. 185-190.
8. Алоян А.Е. Динамика и кинематика газовых примесей и аэрозолей в атмосфере: Курс лекций. – М.: ИВМ РАН, 2002. – 201 с.
9. Марчук Г.И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. – М.: Наука, 1982. – 320 с.
10. Schwarz K.G. Mesa-scale flows over large city // Progress in fluid flow research: turbulence and applied MHD / Eds H. Branover, Y. Unger. – Progress in Astronautic and Aeronautic. – 1998. – V. 182:– P. 271-279.
11. Шатров А.В., Шварц К.Г. Численное моделирование атмосферных мезомасштабных процессов переноса примесей в окрестности города Кирова // Вычисл. мех. сплош. сред. – 2010. – Т. 3, № 3. – С. 117-125. DOI
12. Аристов С.Н., Фрик П.Г. Динамика крупномасштабных течений в тонких слоях жидкости: Препр. / ИМСС УрО РАН. – Свердловск: УрО РАН СССР, 1987. – 48 с.
13. Аристов С.Н., Шварц К.Г. Вихревые течения в тонких слоях жидкости. – Киров: ВятГУ, 2011. – 207 с.

Поступила в редакцию 13.07.11; опубликована в электронном виде 22.10.12

---

#### Сведения об авторах

Шварц Константин Григорьевич, дфмн, проф., Пермский государственный национальный исследовательский университет (ПГНИУ), 614990, Пермь, ул. Букирева, д. 15; E-mail: kosch@psu.ru

Шкляев Владимир Александрович, кгн, доц., ПГНИУ; E-mail: shklyayev@psu.ru